

Titre: Revue de la réglementation sur la valorisation des résidus miniers
Title: hors site au Québec

Auteurs: Marie Tardif-Drolet, Li Li, Thomas Pabst, Gérald Zagury, Raphaël
Authors: Mermillod-Blondin, & Thomas Genty

Date: 2020

Type: Article de revue / Article

Référence: Tardif-Drolet, M., Li, L., Pabst, T., Zagury, G., Mermillod-Blondin, R., & Genty, T.
(2020). Revue de la réglementation sur la valorisation des résidus miniers hors
Citation: site au Québec. Dossiers environnement/Environmental Reviews, 28 (1), 32-44.
<https://doi.org/10.1139/er-2018-0116>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie:
PolyPublie URL: <https://publications.polymtl.ca/4084/>

Version: Version finale avant publication / Accepted version
Révisé par les pairs / Refereed

Conditions d'utilisation:
Terms of Use: Tous droits réservés / All rights reserved

Document publié chez l'éditeur officiel

Document issued by the official publisher

Titre de la revue:
Journal Title: Dossiers environnement/Environmental Reviews (vol. 28, no. 1)

Maison d'édition:
Publisher: NRC Research Press

URL officiel:
Official URL: <https://doi.org/10.1139/er-2018-0116>

Mention légale:
Legal notice: ©2020. This is the author's version of an article that appeared in Dossiers
environnement/Environmental Reviews (vol. 28, no. 1) . The final published version is
available at <https://doi.org/10.1139/er-2018-0116>

Revue de la réglementation sur la valorisation des résidus miniers hors site au Québec

Marie Tardif-Drolet^{1,2}, Li Li^{1,2*}, Thomas Pabst^{1,2}, Gérald J Zagury^{1,2},
Raphaël Memillod-Blondin³, Thomas Genty⁴

¹ IRME UQAT-Polytechnique

² Département des génies civil, géologique et des mines
École Polytechnique de Montréal,
2500, chemin de Polytechnique, Montréal (Québec), H3T 1J4

³ Agnico Eagle Mines Limited
10 200 route de Preissac,
Rouyn-Noranda (Québec), J0Y 1C0

⁴ Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
445 boul. de l'Université
Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4

*Auteur de correspondance. Courriel : li.li@polymtl.ca

Manuscrit er-2018-0116 soumis à la revue : *Dossiers Environnement/Environmental Reviews*

Soumis : novembre 2018

Accepté : 26 avril 2019

Revue de la réglementation sur la valorisation des résidus miniers hors site au Québec

Marie Tardif-Drolet, Li Li*, Thomas Pabst, Gérald J. Zagury,
Raphaël Memillod-Blondin, Thomas Genty

Résumé : Les exploitations minières produisent chaque année des quantités considérables de résidus miniers sous forme de roches stériles et de résidus de l'usine de traitement. Déposés usuellement en surface, ces résidus miniers représentent des sources potentielles d'instabilités géotechniques et géochimiques, voire sources de contaminants à l'eau en surface et en souterrain, et par le fait même, de risques environnementaux. La valorisation des résidus miniers pourrait permettre de diminuer la quantité de ces résidus entreposés à la surface et conséquemment le coût de gestion et de restauration, l'empreinte environnementale et les risques environnementaux associés aux empilements. La valorisation des matières résiduelles est devenue une avenue de plus en plus pratiquée dans le monde entier. Beaucoup de technologies ont été développées et publiées depuis ces dernières années. En revanche, il y a eu très peu de travaux sur l'encadrement légal de l'utilisation des résidus miniers. Les législateurs ont souvent des points de vue et des préoccupations très différents de ceux des promoteurs de la valorisation des rejets miniers. Dans cet article, on présente les lois, règlements et normes applicables qui encadrent la valorisation des résidus miniers au Québec, ainsi que des analyses, des discussions et des recommandations, qui peuvent servir de guide tant pour les promoteurs de projet de valorisation que pour les agences gouvernementales québécoises.

Mots-clés : Mines; Rejets miniers; Résidus miniers; Valorisation; Législation; Règlements

* Auteur de correspondance. Courriel : li.li@polymtl.ca

1 Introduction

Il y a plus d'une trentaine de mines actives au Québec et leur niveau de production individuel est de l'ordre d'un million de tonnes de roches (stériles et minerais, toute catégorie confondue) extraites par année en moyenne (MERN 2017a). La majorité de cette quantité de roches extraites devient des résidus miniers¹ en tant que résidus de l'usine de traitement (« tailings » en anglais) ou de stériles (« waste rocks » en anglais). Le mode de gestion des résidus miniers le plus commun consiste en la déposition en surface sous forme de haldes à stérile et de parc à résidus. Cette déposition comporte généralement des risques environnementaux qui peuvent parfois devenir majeurs, mais difficiles à éliminer totalement en raison de la très longue durée de vie (des centaines d'années et même indéfinie; Vick 1999) et des changements climatiques (Bussière et al. 2017).

La gestion des résidus miniers constitue une dépense importante pour les entreprises minières ou pour le gouvernement provincial ou fédéral au Canada. Au 31 mars 2016, le passif environnemental minier du gouvernement du Québec (coût pour la réhabilitation des sites miniers orphelins et des sites où le MERN pourrait avoir à agir étant donné le statut financier précaire des exploitants) s'élevait à 1,22 G\$ (MERN 2017b). Pour une entreprise minière, le coût en termes de dépôt de garantie financière pour la réalisation du plan de restauration du site minier est un montant important qui peut parfois être sous-estimé. Parfois, le montant nécessaire pour exécuter le plan de restauration du site minier peut être sous-estimé. Les exploitations minières de Timminco, proches de la communauté de Renfrew et de Lockerby, près de la ville de Sudbury en Ontario en sont des exemples (Purdon 2017). Suite à l'insolvabilité des deux exploitations minières, le gouvernement fédéral a dû assumer la fermeture des deux sites miniers dont le

¹ Le terme « résidus miniers » est utilisé pour indiquer les résidus de l'usine de traitement ou rejet du moulin de concentrateur (« tailings » en anglais) dans la majorité des publications scientifiques et académiques. Cependant, il est utilisé pour indiquer l'ensemble des stériles et des résidus de l'usine de traitement dans la législation et la réglementation du MDDELCC (2014a). Sauf indication contraire, le terme « résidus miniers » est utilisé pour indiquer l'ensemble des stériles et des résidus de l'usine de traitement dans cet article.

coût réel s'est avéré nettement supérieur au coût estimés dans les plans de fermeture initiaux (soit 3.47 M\$ plutôt que 1 M\$) (MiningWatch Canada 2014; Purdon 2017). De plus, les entreprises minières font face à la taxation sur chaque tonne de résidus miniers déposée en surface imposée par le gouvernement provincial au Québec. Cela pourrait avoir des impacts importants sur les opérations à ciel ouvert qui produisent souvent des quantités très importantes de résidus miniers telle que la mine Canadian Malartic qui prévoit un entreposage en surface de 326 Mt de roches stériles et 183 Mt de résidus de traitement (Gervais et al. 2014).

Ces défis poussent les exploitations minières à chercher de nouvelles solutions. En ce sens, l'utilisation des résidus miniers comme matières premières sur le site minier ou hors site est devenue de plus en plus populaire. À titre d'exemple d'utilisation de résidus miniers comme matière première sur un site minier, on peut nommer l'utilisation de résidus de l'usine de traitement non-réactifs ou désulfurés comme un matériau dans une couverture à effet de barrière capillaire (CEBC; Bussière et al. 2017). On peut mentionner aussi l'utilisation des roches stériles comme un matériau de protection dans le système CEBC ou comme un matériau drainant et de renforcement (connu sous le nom d'inclusions de roches stériles; Saleh Mbemba 2016) dans la construction des parcs à résidus miniers. Actuellement, l'utilisation de résidus de l'usine de traitement et des roches stériles comme matériaux de remblai dans les chantiers souterrains est devenue une pratique courante dans les mines modernes (Li et Aubertin 2012; Li 2014a, 2014b; Liu et al. 2017, 2018; Dalcé et al. 2019; Yang et al. 2017; Pagé et al. 2019). En ce qui a trait à l'utilisation de résidus miniers comme matière première hors du site minier, on peut nommer l'utilisation de résidus miniers inertes dans la fabrication de briques (Zhang 2013; Gopez 2015; Taha et al. 2017), l'utilisation de la fraction granulométrique grossière comme agrégats dans la construction, l'utilisation de roches stériles inertes pour la construction des fondations de route ou pour la construction de digues (FHWA 2016). Une liste plus complète des diverses avenues possibles de cette pratique, appelée

valorisation des résidus miniers, est présentée dans le mémoire de Tardif-Drolet (2018). Cette pratique pourrait avoir un double avantage économique pour l'industrie minière. Pour la mine productrice, la valorisation des résidus miniers permettrait de diminuer la quantité de résidus miniers déposés en surface, et ainsi réduire les coûts de gestion et de restauration du site minier. Dans certains cas, la vente de résidus miniers pourrait constituer une source de revenus supplémentaires. Pour l'acheteur de résidus miniers utilisés comme une matière première, une économie importante pourrait être réalisée par l'élimination des coûts importants normalement nécessaires pour l'extraction par le forage et le dynamitage et pour la manutention du matériau incluant le transport, le concassage et le broyage pour diminuer la granulométrie.

Une étude menée par Bussière (2007) sur les résidus des usines de traitement de mines de roche dure au Québec montre que ces derniers contiennent typiquement au moins 50% de particules dont le diamètre varie entre 10 et 100 μm . Cette portion de particules est particulièrement intéressante pour de nombreuses utilisations nécessitant des matériaux inorganiques ayant une granulométrie fine. C'est notamment le cas dans la production des produits cimentaires (Faubert 2013). De plus, les résidus de l'usine de traitement sont disponibles en quantité beaucoup plus élevée que la plupart des autres matières résiduelles (déchets domestiques, par exemple) pouvant être utilisées comme matière première sur le marché, ce qui est un avantage considérant l'ampleur de nombreux travaux d'ingénierie civile (Mehta et Siddique 2016).

Jusqu'à présent, il y a eu de nombreuses publications sur le potentiel technique de la valorisation des résidus miniers comme matière première pour de nombreuses utilisations hors site. Par exemple, plusieurs travaux ont porté sur l'utilisation des résidus de l'usine de traitement comme matière première pour la fabrication de céramiques (Garcia-Valles et al. 2007; Ahmari et Zhang 2012; Liu et al. 2015; Taha et al. 2017). Les résidus de l'usine de traitement peuvent être également utilisés comme additifs pour améliorer les propriétés anti-feu (Sakkas et al. 2014). Des travaux ont aussi porté sur l'utilisation de résidus de l'usine de traitement dans la fabrication de liants pour la fabrication de ciment géopolymères ou de

matériaux d'activation alcaline (Pacheco-Torgal et al. 2007; van Deventer et Xue 2000; Feng et al. 2011; Caballero et al. 2014; Gopez 2015; Luukkonen et al. 2017).

Les matériaux d'activation alcaline (AAM pour *Activated Alkaline Materials*) sont des liants issus de la réaction des aluminosilicates avec un milieu très fortement alcalin (Provis 2017). Un géopolymère peut aussi être issu de la réaction en milieu alcalin d'un aluminosilicate. Plusieurs aspects distinguent les AAM des géopolymères dont leurs performances mécaniques. Les AAM produisent des précipités ou des hydrates, mais non des polymères. C'est le cas notamment de ciments produits à partir de laitier de hauts fourneaux. Le ciment géopolymère et le ciment AAM partagent les premières étapes de réactions. Mais le processus de polymérisation s'arrête aux composés d'hydrates et de précipités pour les AAM, alors que la présence de métakaolin permet la formation de polymères de degré supérieur pour les géopolymères (Geopolymer Institute 2014; Davidovits 2015). La plupart des travaux utilisent de l'hydroxyde de sodium (NaOH) ou de l'hydroxyde de potassium (KOH) comme réactif, mais les matériaux géopolymères peuvent également être produits sans ingrédients corrosifs (Davidovits 2015).

Les deux technologies peuvent servir à produire des liants à partir de résidus issus de l'usine de traitement, comme matière première pour la fabrication de béton sans ciment Portland (Davidovits 2015; Provis 2017). Plusieurs travaux appuient également les performances des briques et ciments AAM (Pacheco-Torgal et al. 2010; Pacheco-Torgal et Said 2011; Wang et al. 2014; Luukkonen et al. 2017), des ciments et briques géopolymères (Ahmari 2012; Komnitsas et al. 2012; van Deventer et al. 2012; Sakkas et al. 2014; Davidovits 2015; Gopez 2015; Zhang et al. 2016) concernant les normes et standards mécaniques et environnementaux. Davidovits (2015) a également évalué l'effet d'encapsulation sur quatre types de résidus de l'usine de traitement en sol canadien dont les résidus de la mine de métaux Kam Kotia caractérisés par une teneur élevée en sulfures et un pH acide de 1.5-2 ainsi que les résidus de la mine d'uranium Mid West caractérisés par une teneur élevée en arséniures, radionucléides et sulfures et un pH

acide de 2.5. Les résultats montrent que les AAM ont une résistance chimique moindre que les géopolymères en raison de leur différence en composition d'hydrates et de précipités (Geopolymer Institute 2016). La résistance chimique d'un produit peut avoir une influence directe sur son impact environnemental. Selon Silva et al. (2012), la résistance chimique des AAM peut être améliorée avec différents traitements tels que des cures à des températures entre 80°C et 130°C alors que la cure des ciments géopolymères se fait à température ambiante pour être reconnus comme tels (Geopolymer Institute 2016).

Bien que les performances techniques et environnementales des ciments géopolymères et AAM puissent rencontrer les normes et standards, il est impossible de les intégrer au marché de la construction en raison des restrictions d'une norme importante liée à l'ingénierie civile au Canada. En effet, la norme CAN/CSA-A3000-F13 Compendium des matériaux liants (CAN/CSA Group 2013) non seulement comporte des exigences envers les performances techniques, mais définit également les liants pouvant être utilisés dans le béton; les AAM et les ciments géopolymères ne font présentement pas partie de la liste des liants reconnus dans cette norme. Alors que les technologies des géopolymères et des AAM permettent une valorisation intégrale des résidus miniers, on voit également la valorisation partielle des résidus miniers par l'extraction secondaire de matières premières à valeurs économiques sur le marché (Chouinard 2006; Idres et al. 2017; Ma et al. 2014). Par rapport à ces nombreuses publications et travaux de recherche, on constate qu'il y a peu de travaux sur l'encadrement légal de l'utilisation des résidus miniers. Les points de vue et les préoccupations des législateurs peuvent diverger de ceux des promoteurs de projets de valorisation. Il est donc nécessaire de comprendre et d'analyser les origines de différents lois et règlements afin d'établir une législation et une réglementation objectives qui favorisent la valorisation des résidus miniers hors site tout en protégeant l'environnement ainsi que la santé et la sécurité des populations à court, moyen et long terme.

Dans cet article, l'encadrement légal de la valorisation des résidus miniers hors site au Québec sera présenté en détail, suivi d'une analyse et une discussion.

2 Un aperçu général sur le cadre législatif de la valorisation des résidus miniers au Québec

La notion de valorisation découle du principe des 3RV-E (Réduire, Réemployer, Recycler, Valoriser, Éliminer) proposé par le MDDEP pour mieux gérer les matières résiduelles dans un modèle d'économie circulaire. Ce principe est central dans la politique québécoise de gestion des matières résiduelles et de son plan d'action de 2011-2015 (MDDEP 2011). Selon ce principe, un résidu valorisé remplaçant une matière première pour un produit ou un ouvrage peut lui-même être amené à être valorisé à la fin de vie utile du produit ou de l'ouvrage. Cet aspect sera abordé plus en détail dans la section « 3.2.4.2 Démantèlement ».

Au Québec, la valorisation des résidus miniers hors site est régie par plusieurs lois et règlements. Plus d'une cinquantaine de lois et de règlements peuvent s'appliquer à l'encadrement de la valorisation des résidus miniers en considérant certains aspects tels que la protection de la faune et de la flore, le potentiel agricole des lieux utilisés et l'émission de polluant atmosphérique dangereux pour l'homme. Les plus contraignants et exigeants sont ceux et celles étroitement liés à la considération de l'environnement, incluant notamment la *Loi sur la Qualité de l'Environnement*, *le règlement sur les attestations d'assainissement en milieu industriel*, *le règlement relatif à l'évaluation des impacts sur l'environnement de certains projets*, *le règlement sur les matières dangereuses* et *le règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains*. Une liste complète des lois et des règlements qui encadrent la valorisation des résidus miniers est donnée à l'Annexe 1.

Certains règlements peuvent être appliqués à une partie du processus de valorisation des résidus miniers. Plusieurs d'entre eux ont un impact mineur sur les projets de valorisation des résidus miniers ou

sont applicables dans des circonstances spécifiques. C'est notamment le cas avec les lois et règlements encadrant les emplacements utilisés pour les installations, l'entreposage, le transport ainsi que les procédés de traitement utilisés.

- En plus des lois et des règlements, certains guides donnés dans l'Annexe 2 sont essentiels à la compréhension de l'encadrement légal de nombreux projets de valorisation de résidus miniers. C'est notamment le cas avec la Directive 019 et la Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés.

Enfin, il est important de mentionner qu'un volet de l'encadrement légal n'est pas couvert par le présent article. Il s'agit de la Loi sur la Santé et la Sécurité du Travail (LSST) et les règlements connexes. En effet, même si la LSST n'est pas explicitement restrictive en matière de valorisation de résidus miniers, elle peut apporter des conditions contraignantes sur le plan technique et économique lors de l'exécution du projet de valorisation par des travailleurs dont la santé et la sécurité peuvent être affectées par les contacts directs ou indirects avec des matériaux potentiellement dangereux. L'impact de la LSST sur la réalisation des projets de valorisation contenant des matières dangereuses peut être particulièrement important à l'étape du traitement, de l'entreposage et du transport. Cet impact a été constaté par le Centre de Technologie Minérale et de Plasturgie (CTMP) au Québec qui a travaillé pour de nombreuses exploitations minières sur des projets de valorisation de résidus miniers au cours des dernières années. Il a été constaté que les projets de gestion de matières dangereuses, telle que les résidus des mines d'amiante de la région de Thetford Mines, coûtaient jusqu'à 30 % plus cher en raison des restrictions découlant de la LSST (Hébert 2017).

3 Étapes de valorisation des résidus miniers hors site

3.1 Cycle de valorisation d'un résidu minier

Pour mieux comprendre l'impact de la législation et de la réglementation sur la réalisation d'un projet de valorisation, les différentes étapes de la valorisation des résidus miniers hors site sont présentées à la

figure 1 sous un diagramme circulaire. Un projet de valorisation d'un résidu minier peut être divisé en trois étapes principales : planification, exploitation sur site et exploitation hors site. L'étape de planification consiste à anticiper les ressources nécessaires à la réalisation du projet de la valorisation, en évaluer les impacts et obtenir l'approbation des législateurs. L'étape d'exploitation sur site consiste à préparer la matière résiduelle à son utilisation hors site. Finalement, l'étape d'exploitation hors site consiste à utiliser des résidus miniers comme matière première pour un projet de valorisation.

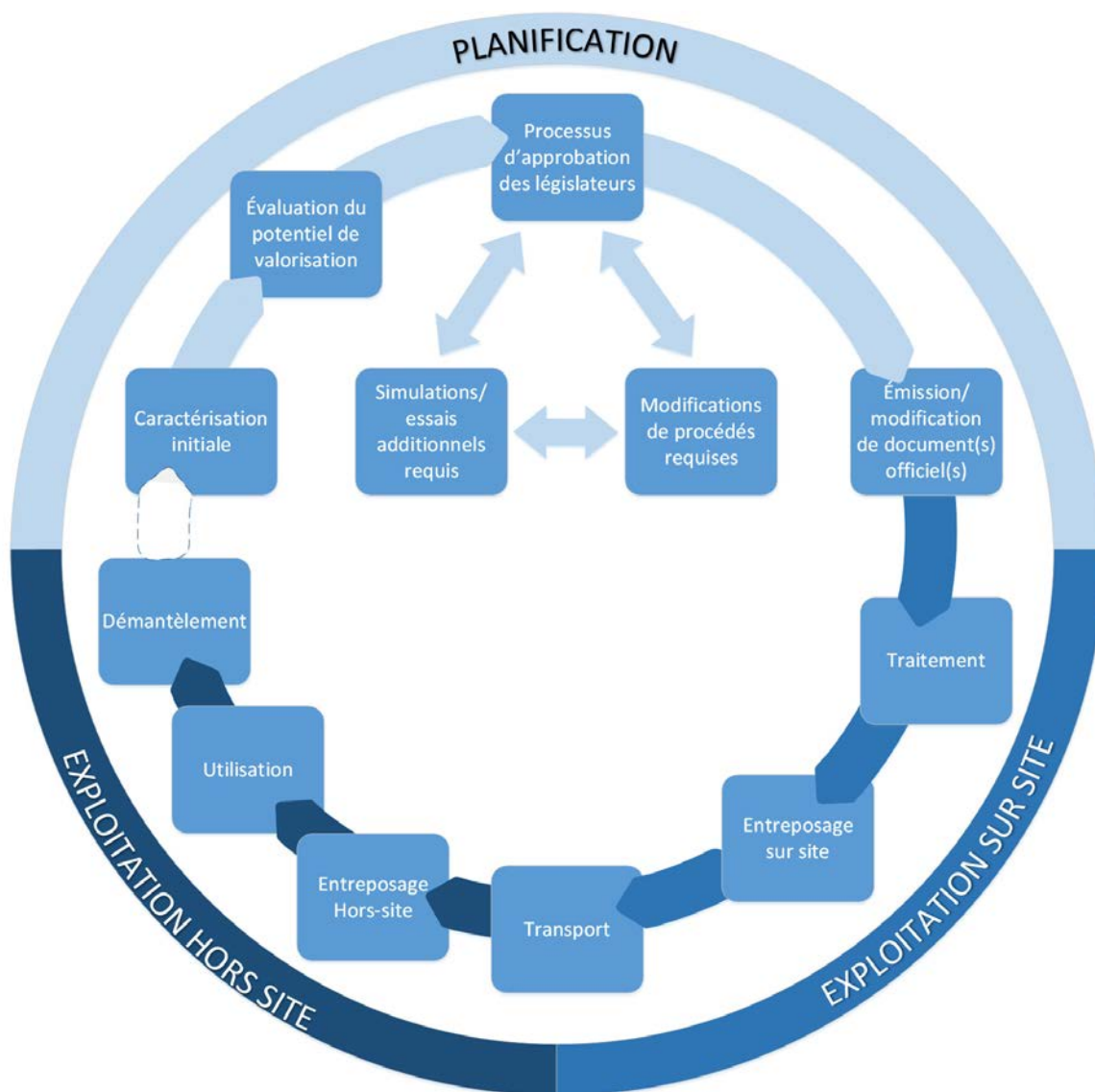


Figure 1 : Cycle de valorisation d'un résidu minier.

La distinction entre les étapes sur site et hors site est nécessaire d'un point de vue législatif, car la responsabilité environnementale peut revenir au producteur des résidus miniers dans le premier cas (sur site) ou à l'acheteur dans le deuxième cas (hors site). Cette distinction est aussi importante parce que la responsabilité environnementale touche le propriétaire du terrain où il y a risque de contamination par le résidu minier. Plusieurs lois et règlements environnementaux sont formulées selon les milieux récepteurs, d'où l'importance de la localisation du projet dans l'encadrement des étapes.

Selon la figure 1, la phase de planification inclut la caractérisation initiale, l'évaluation du potentiel de valorisation, le processus d'approbation des législateurs qui peut nécessiter des essais et la modification du procédé dans le but d'obtenir l'acceptation du projet. Cette reconnaissance peut être obtenue sous la forme d'une autorisation ou d'attestation d'assainissement. En général, un projet de valorisation des résidus miniers commence toujours par la caractérisation des propriétés physiques, minéralogiques, chimiques, hydrogéologiques et mécaniques. Ces propriétés constituent des éléments importants de base dans le processus d'évaluation du potentiel de valorisation de ces résidus miniers.

La phase d'exploitation sur site regroupe les étapes de traitement et d'entreposage. L'étape du transport est intermédiaire entre la phase d'exploitation sur site et la phase d'exploitation hors site. De ce fait, la responsabilité légale des résidus miniers peut appartenir au promoteur de projet ou à l'acheteur, selon celui effectuant le transport. Autrement, la responsabilité de l'impact environnemental de la gestion des résidus miniers est partagée entre le responsable de sa gestion, qui peut être l'acheteur ou le promoteur selon le cas et le propriétaire du terrain impacté.

Comme la responsabilité environnementale appartient au propriétaire des résidus miniers ainsi que du terrain sur lequel ceux-ci sont entreposés et utilisés, une autorisation peut être nécessaire pour l'exploitation sur site et hors site. L'attestation d'assainissement, outil légal du *Programme de Réduction des Rejets Industriels* (PRRI) regroupant les autorisations délivrées à certaines industries, peut également

couvrir certaines activités de valorisation hors site puisqu'elles sont liées à la gestion des résidus (MDDELCC 2014b). L'étape de la demande d'autorisation sera abordée dans la section 3.2.1.3.

Enfin, la phase d'exploitation hors site regroupe le second entreposage des résidus miniers (si nécessaire), l'utilisation et le démantèlement à la fin de vie utile de l'ouvrage ou du produit pour lequel le résidu minier a été employé.

Le diagramme montré à la figure 1 peut être utile pour une mine qui souhaite valoriser ses résidus, tout comme pour tout autre promoteur externe de projet de valorisation de résidus miniers. Certaines compagnies québécoises exploitent déjà les résidus miniers comme matière première, telles qu'Olimag (Lalancette et al. 1986; Olimag 2018), Béton Fournier (Fournier et Fils 2016), Harsco Métaux et Minéraux (Harsco 2012) ainsi qu'Alliance Magnésium (Alliance magnésium 2013).

3.2 Réalisation d'un projet de valorisation des résidus miniers hors site

3.2.1 Planification de la valorisation des résidus miniers

3.2.1.1 Caractérisation initiale des résidus miniers

Jusqu'à présent, le gouvernement du Québec a publié deux guides pour les promoteurs de projets de valorisation de résidus miniers. Les cheminements nécessaires ont été précisés pour l'obtention d'une autorisation. Le premier a été publié en 2002, nommé Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction (MDDEP 2002). Le deuxième, publié en 2014 et appelé Lignes directrices relatives à la valorisation des résidus miniers, balise davantage la pratique de la valorisation sur site (MDDELCC 2014a). Le guide de 2002 exige une caractérisation à l'égard de l'annexe 2 : Grille des critères génériques pour les sols du Guide d'intervention Protection des sols et réhabilitations des terrains contaminés (actualisé en 2016; MDDELCC 2016b). Cette première caractérisation sert principalement à évaluer la composition chimique des résidus et leur potentiel d'impact environnemental. Elle est aussi commune à tout projet minier

puisqu'elle fait partie de la caractérisation requise par la Directive 019 (MDDEP 2012) pour la classification des résidus.

L'un des documents législatifs les plus importants à ce stade de la planification pour la valorisation des résidus miniers est le règlement sur les matières dangereuses (RMD). Bien que les résidus miniers sont exclus de la catégorie des matières dangereuses par l'article 2 du RMD, le promoteur du projet doit tout d'abord et tout de même faire les analyses de caractérisation prescrites dans l'Annexe II de la *Directive 019* pour déterminer si les résidus miniers à valoriser se comportent comme une matière dangereuse selon l'article 3 du RMD. L'évaluation porte sur la conformité aux critères établis par le RMD, tels que les critères de lixiviation et la présence de radionucléides en raison de leur impact potentiel sur l'environnement et la santé humaine (MDDELCC 2014a).

Les critères de lixiviation du RMD ont été établis en s'inspirant des Toxicity Characteristic Rules de la Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) de l'Environmental Protection Agency aux États-Unis (USEPA 1994). L'analyse prescrite pour évaluer la conformité aux critères et le protocole utilisé dans la Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) sont tirés de la législation et la réglementation américaine USEPA (1994) par le MDDELCC (2017a). Il y a quelques différences entre les deux familles de critères, notamment pour le bore, le cadmium ainsi que le mercure. Un résidu qui dépasse les critères de lixiviation peut être traité pour devenir conforme. C'est notamment le cas de l'utilisation des résidus de l'usine de traitement désulfurés comme un matériau de couverture dans le système CEBC pour prévenir le drainage minier acide des roches stériles ou des résidus de l'usine de traitement (Bussière et al. 2017).

Si un résidu minier est caractérisé comme dangereux selon un ou plusieurs critères du RMD, sa valorisation devient significativement plus complexe, en raison des mesures spécifiques à prendre ou des restrictions plus strictes et plus sévères s'appliquant à son utilisation. Par exemple, lorsqu'un résidu minier dépasse les critères de lixiviation du RMD, son entreposage sur des sols et son utilisation sans traitement

sont interdits par la Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés (MDDELCC 2017b).

La caractérisation en vertu des critères du RMD est commune à tout résidus miniers en vue de leur valorisation. Mais cette caractérisation peut comporter d'autres exigences supplémentaires dans l'optique d'encadrer le résidu valorisé selon certain processus spécifique. Dans certain cas particulier, la partie valorisée du résidu minier « perd » son titre de résidus miniers et l'encadrement général peut être remplacé par un encadrement plus spécifique au produit obtenu de la partie valorisée. C'est le cas notamment du cuivre extrait des résidus d'une mine d'or qui n'est plus considéré comme un résidu minier. Cette ambiguïté de la Loi est discutée plus amplement dans la section 4.

3.2.1.2 *Évaluation du potentiel de valorisation*

Afin d'évaluer le potentiel de valorisation des résidus miniers, le promoteur du projet doit faire une seconde caractérisation donnant un aperçu des performances du résidu minier sur le plan technique. On y retrouve principalement des détails quant aux propriétés mécaniques et physiques du résidu minier, par exemple la cristallographie et la résistance en compression uniaxiale UCS (*Uniaxial Compressive Strength*). Cette caractérisation peut comprendre une analyse plus détaillée de l'impact environnemental du résidu minier en fonction de ses performances aux différents essais de l'étape précédente ou du potentiel de valorisation estimé. Par exemple, des briques fabriquées à l'aide de résidus de l'usine de traitement peuvent nécessiter plusieurs cycles de mouillage-séchage ou d'autres tests dynamiques afin de s'assurer de l'intégrité physique et chimique du matériau à long terme (Ahmari 2012). La présente section ne vise pas à regrouper l'ensemble des critères techniques pour toutes les avenues possibles de valorisation des résidus miniers, mais plutôt à présenter comment l'encadrement légal influence la viabilité technique d'un projet de valorisation.

Tout d'abord, le MDDELCC demande généralement aux promoteurs de produire l'étude de marché, les caractérisations et les tests nécessaires concernant une utilisation visée afin d'en démontrer la viabilité technique et économique. Le MDDEP (2002) suggère différentes avenues selon l'impact environnemental du résidu. Ces avenues sont parmi les plus accessibles technologiquement pour les matières inorganiques (p.ex. industrie de la construction, remplacement d'une autre matière première inorganique déjà présente sur le marché). Pour certaines de ces avenues, plusieurs normes sont déjà implantées et peuvent être obligatoires selon les différents paliers législatifs dont le municipal. Parmi ces normes, les plus communes sont :

- Norme BNQ 0419-090 Amendements minéraux – Amendements calciques ou magnésiens provenant de procédés industriels
- Norme BNQ 2560-114 Travaux de génie-civil-Granulats
- Norme CAN/ULC-S702-14 Norme sur l'isolant thermique de fibres minérales pour bâtiments
- Norme CAN/CSA-S474-04 (C2009) : Structures en béton
- Norme CAN/CSA-A3000-F13- Compendium des matériaux liants.

3.2.1.3 Approbation

Les législateurs doivent être consultés sans exception même si l'on n'a pas besoin d'obtenir d'autorisation. La communication avec les législateurs est un processus itératif. En effet, la jurisprudence démontre que l'absence de démarche prise par le promoteur du projet auprès du MDDELCC peut décrédibiliser le projet pour des intervenants externes par la suite (Ville de Terrebonne c. 3479447 Canada Inc. 2014).

Pour les exploitations minières, cette démarche auprès du MDDELCC est similaire à celles faites pour les autres demandes antérieures d'autorisation pour les activités d'exploitation. Les législateurs peuvent exiger des modifications au procédé et à la gestion des résidus, ainsi que des études supplémentaires en vue de l'obtention d'une autorisation ou la modification de leur attestation d'assainissement. Le contenu

des autorisations ou des modifications apportées à l'attestation d'assainissement varient selon le besoin d'encadrement perçu par les législateurs. Des normes supplémentaires peuvent également être imposées par le MDDELCC (2014b). Ce processus est essentiellement itératif jusqu'à la satisfaction des parties prenantes. La durée de ce processus peut être variable, spécialement dans le cas de demande de modification au procédé qui peut avoir un impact significatif sur la production, les installations et les produits sortant de l'usine de traitement ou dans la demande de documentation supplémentaire concernant une nouvelle avenue de valorisation.

Cette étape sert également à déterminer les normes de suivi pour les étapes suivantes du processus qui seront transmises périodiquement aux législateurs concernés.

Il est à noter que les projets de valorisation réalisés au nord du 55° parallèle sont sujets à une procédure d'évaluation supplémentaire incluant l'approbation des communautés autochtones locales (MDDELCC 2016a).

Le principal document législatif à considérer à l'étape de la demande d'autorisation est le Guide Explicatif - Projet Industriel-Demande de Certificat d'Autorisation - Demande d'Autorisation. Cet outil sert non seulement de référence aux échanges avec les représentants du MDDELCC, mais offre aussi plusieurs points de repère quant à l'encadrement législatif nécessaire au projet de valorisation. Le guide reprend l'évaluation préalable du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP) et de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune (LCMVF). Il oriente le promoteur du projet dans sa recherche en lien avec les lois et règlements pertinents et connexes (voir la liste donnée à l'Annexe 3 de l'article).

Le processus de la demande d'autorisation est nécessaire afin de s'assurer que la réalisation du projet respectera entre autres les conditions imposées selon l'esprit de l'article 22 de la Loi sur la Qualité de l'Environnement (LQE) (Cassista 2017). L'article 22 de la LQE n'est plus présent dans la version de la

LQE en date de mars 2018. Cependant, le pouvoir du ministre d'inclure des conditions dans un document d'autorisation est toujours en vigueur.

Une mention particulière est à apporter par rapport à la Loi sur la Protection du Territoire et des Activités Agricoles puisque la soumission d'une demande d'autorisation auprès du MDDELCC exige la décision de la Commission de la protection du territoire agricole (CPTAQ) préalablement obtenue par le promoteur concernant les lieux où se dérouleront les activités du projet. La CPTAQ s'assurera que les emplacements d'entreposage choisis ne soustraient pas le milieu d'une terre pouvant servir à l'agriculture. La CPTAQ considérera entre autres le potentiel agricole du sol selon un système de classe et l'impact environnemental causé par la circulation advenant la disponibilité d'un terrain de classe inférieure, mais située plus loin (Graymont (Qc) inc. c. Québec 2015).

Enfin, la réalisation d'un projet de valorisation peut entraîner un producteur qui initialement n'était pas soumis au Règlement sur les attestations d'assainissement en milieu industriel à le devenir puisqu'une attestation d'assainissement est obligatoire à partir d'une capacité annuelle de traitement de minerais ou de résidus de l'usine de traitement excédant 50 000 tonnes métriques par année. Un établissement voulant modifier sa capacité de traitement afin de traiter ses résidus de l'usine de traitement en vue de les valoriser peut ainsi nécessiter une attestation d'assainissement.

3.2.1.4 Émission/modifications des documents d'approbation

L'approbation du MDDELCC peut être faite autrement que par la délivrance d'une autorisation ou d'une modification à l'attestation d'assainissement déjà délivrée. Selon Cassista (2017), une approbation valable du MDDELCC a été définie comme suit :

« [...] Les activités de valorisation doivent cependant être encadrées par une autorisation au sens large : un certificat d'autorisation, une lettre, un courriel ou tout autre document. L'autorisation doit préciser qu'il s'agit d'une activité de valorisation de résidus miniers. »

C'est le cas notamment d'engrais minéral ou d'amendements calcaires et magnésiens faits à partir de résidu de l'usine de traitement. Ceux-ci ne nécessitent pas de certificat d'autorisation lors de la valorisation, c'est-à-dire dans ce cas-ci, l'épandage.

3.2.2 Exploitation sur site

3.2.2.1 Traitement

Le traitement de résidu minier afin d'en extraire les minerais valorisés est encadré par les mêmes exigences que pour le traitement du minerai (MDDEP 2012). Les établissements industriels désirant récupérer les résidus miniers pour valorisation doivent suivre sensiblement les mêmes lignes directrices que pour le traitement du minerai, notamment les Objectifs Environnementaux de Rejet (OER) pour tout traitement rejetant un effluent dans le milieu aquatique (MDDEP 2008).

Il est utile de souligner que les objectifs inhérents à la valorisation des résidus miniers peuvent faciliter certains processus d'approbation du procédé comme la démonstration des Meilleures Technologies Disponibles et Économiquement Réalisables (MTDER) (MDDEP 2008), ou l'atteinte d'une gestion optimisée des résidus miniers. Par exemple, l'inclusion de procédés visant à produire un résidu valorisable peut être bénéfique en vue d'atteindre les objectifs environnementaux de résidus miniers. En effet, la valorisation permet de réduire la quantité de résidus à entreposer en surface et peut dans certains cas réduire la contamination de l'eau de drainage ainsi que les efforts requis et les coûts de la gestion et de restauration des parcs à résidus.

3.2.2.2 Entreposage sur site et hors site

Les lieux d'entreposage des résidus miniers à valoriser hors site doivent suivre les mêmes lignes directrices que pour l'entreposage sur un site minier (MDDEP 2012) et en particulier les documents suivants :

- Directive 019
- Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains

- Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles

Par exemple, une aire d'accumulation hors site de résidus miniers à faible risque doit, tout comme les aires d'accumulation sur site, respecter la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (MDDEP 2012).

Une mention doit être faite concernant l'impact du RMD sur l'entreposage des résidus miniers. Un résidu minier ne peut être entreposé directement sur le sol tant qu'il ne respecte pas les critères² de sol de l'annexe 2 du Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains, même s'il n'est pas classifié dangereux selon le RMD (MDDELCC 2017a). La Directive 019 reprend ces conditions dans la classification donnée et appelle ce type de résidus miniers « résidus à faibles risques » car ces résidus doivent respecter les critères de matière non-dangereuse du RMD et les critères de sol de l'annexe 2 du Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains.

Par contre, un résidu classé comme une matière dangereuse selon le RMD peut se voir refuser tout entreposage hors site. L'encadrement légal concernant les résidus autres qu'à faible risque pour l'environnement tel que déterminé par la Directive 019 vise à encadrer leur gestion sur le site même de la mine. Le sujet est davantage détaillé à la section 5.1. L'entreposage hors site de résidus miniers classés autrement qu'à faibles risques tel que déterminé par la Directive 019 serait non seulement illégal, mais également contraire à l'esprit de la Loi. Selon ces conditions, le MDDELCC pourrait imposer un traitement ou une transformation des résidus pour que l'aspect dangereux des résidus soit neutralisé avant même leur transport vers l'extérieur du site.

² Les critères ciblés dépendent du sol-récepteur. Sur sol A, résidus A peuvent être entreposés; sur sol B, résidus A et B peuvent être entreposés; sur sol C, résidus A, B et C peuvent être entreposés.

3.2.3 Transport

Outre les lois et règlements généraux appliqués par Transport Canada et le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports au Québec, les principaux lois, règlements et décrets pouvant encadrer spécifiquement le transport des résidus miniers valorisés ou en vue de l'être sont les suivants :

- Loi de 1992 sur le transport des marchandises dangereuses
- Règlement sur le transport des marchandises dangereuses
- Règlement sur le transport des matières dangereuses
- Loi sur les transports
- Décret concernant l'exclusion de certains biens et matières de la définition de « transport routier des marchandises »³
- Règlement sur la qualité de l'atmosphère

Ces lois et règlements touchent principalement l'état dans lequel la matière doit être transportée et les dispositifs servant à contenir une matière ou un produit dangereux, ainsi que l'émission de particules fines. Cette dernière disposition est commune au transport de résidus de l'usine de traitement et de sable et concassé, en raison de la présence de poussières de silice. En effet, tout comme la roche mère, les résidus de l'usine de traitement contiennent majoritairement de la silice. Les résidus de l'usine de traitement sous formes solides sont donc sujets à des normes d'émission de poussières lors du transport.

³ Dans le cas de matières non transformées au même titre que le transport de minerais.

3.2.4 Exploitation hors site

3.2.4.1 Utilisation

L'utilisation est l'étape à laquelle la notion de valorisation se concrétise. Pour être considéré valorisé, le résidu minier doit remplacer un autre produit ou matière première et doit servir à un projet utile. Comme pour les étapes précédentes du projet, l'utilisation doit également ne pas être source de contamination. Cela signifie que le fournisseur doit s'assurer de cet aspect dans l'utilisation, même s'il n'en est pas l'utilisateur. Une base de critères utilisés par le MDDELCC pour évaluer cette précaution est présentée dans le guide de référence Lignes directrice relatives à la valorisation des résidus miniers (MDDELCC 2014a).

Les lois et règlements entourant l'utilisation de résidus miniers valorisés sont principalement constitués des normes en vigueur liées au produit que les résidus valorisés remplacent. L'encadrement législatif général concernant l'environnement, la santé ou tout autre aspect du même ordre a déjà été couvert lors des étapes précédentes. Des encadrements supplémentaires peuvent s'ajouter en fonction de l'ouvrage ou du produit final selon l'esprit de *gentlemen's agreement* (engagement d'honneur), tel que discuté dans la section 4.1.

Il y a également certains guides mis à la disposition des promoteurs de projets de valorisation pour des produits précis :

- Guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes
- Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction.

Enfin, le MDDELCC peut exiger des preuves d'entente ou de contrat nécessaire à la réalisation d'un projet de valorisation afin de délivrer un certificat d'autorisation.

3.2.4.2 Démantèlement

L'importance de la notion de substitution d'une autre matière première par le résidu minier pour que celui-ci soit reconnu comme valorisé par le MDDELCC a été soulignée précédemment. Cette condition assure implicitement une similitude sur le plan des performances techniques et des caractéristiques entre le résidu valorisé et la matière première remplacée. L'encadrement légal s'assure également d'un impact environnemental équivalent ou moindre. En revanche, il n'y a pas d'encadrement légal spécifiquement lié au démantèlement des ouvrages contenant des résidus miniers valorisés. La réglementation liée au démantèlement sera fonction du produit, par exemple pour les résidus de l'usine de traitement valorisés en béton, brique ou asphalte. Le promoteur peut dans ce cas se référer au guide du MDDELCC *Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique et d'asphalte issus des travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille* (MDDEP 2009).

Enfin, bien que le promoteur ne soit pas tenu de se conformer à la norme *CSA Z782-06 : Lignes directrices pour la conception en vue du désassemblage et de l'adaptabilité dans les bâtiments*, cette norme peut renseigner le promoteur de projet de valorisation touchant l'industrie du bâtiment et l'aider à anticiper l'impact environnemental au moment du démantèlement.

4 Analyse des lois, politiques et règlements applicables

4.1 Esprit de la loi : Gentlemen's agreement et expertise technique

C'est lors de l'entente de 2000 entre l'Association des industries forestières du Québec (AIFQ) et le Ministère de l'Environnement du Québec (MENV, aujourd'hui MDDELCC) que la délivrance de la première génération d'attestation d'assainissement a eu lieu (DesMarchais 2005). Cette entente, qualifiée de « gentlemen's agreement » (engagement d'honneur) (DesMarchais 2005), consiste en une entente fondée sur la bonne foi des parties concernées. Cet esprit d'entente est resté inchangé depuis et les

principes qui ont dicté les attestations d'assainissement pour l'industrie forestière dans les années 2000 sont les mêmes que ceux qui dictent celles des industries minières aujourd'hui.

Cet esprit d'entente et de bonne foi est caractéristique des processus d'approbation du MDDELCC, qui s'appuie sur les propositions des entreprises en premier lieu plutôt qu'une imposition unilatérale de conditions ou de décisions par le législateur au promoteur du projet (DesMarchais 2005). La reconnaissance de l'expertise technique de l'industrie se retrouve tout au long du processus d'approbation du MDDELCC. Par exemple, dans le Guide d'information sur l'utilisation des objectifs environnementaux de rejets relatifs aux rejets industriels dans le milieu aquatique, servant de base dans le processus d'approbation du MDDELCC envers une industrie rejetant ses effluents dans un milieu aquatique, un des critères servant d'outil à l'évaluation des demandes est la notion de meilleures technologies disponibles et économiquement réalisables (MTDER). Ainsi, lors de sa demande d'approbation, le demandeur doit justifier le choix des procédés et des technologies de traitement retenus à la conception d'un projet. L'exemple de MTDER témoigne de l'esprit du « gentlemen's agreement » qu'une valorisation des résidus miniers peut être incluse dans la démonstration de MTDER, mais pas spécifiquement impactée par la notion de MTDER.

La valeur de l'entente et de bonne foi est aussi à la base du processus d'itération décrit dans le cycle de vie d'un résidu minier plus haut. C'est dans les échanges répétés avec le ministère que ce dernier peut déterminer l'encadrement environnemental d'un projet et que le promoteur peut s'adapter à cet encadrement. On remarque dans le Guide d'information sur l'utilisation des objectifs environnementaux de rejets relatifs aux rejets industriels dans le milieu aquatique que ce processus itératif de communication est souhaité et encouragé par le MDDELCC par les étapes facultatives ajoutées à la démarche générale d'utilisation des OER, décrites comme suit (MDDEP 2008) :

- « Étape 1 : Demande d'avis environnemental préalable à la demande d'acte statutaire.

- *Étape 2 : Avis environnemental préalable.*
- *Étape 3 : Poursuite du projet initial?*
 - *Oui, demande d'acte statutaire.*
 - *Non, modifications du projet?*
 - *Oui, demande d'acte statutaire.*
 - *Non, abandon du projet. »*

Ces étapes facultatives suggérées par le ministère comprennent une demande d'avis environnemental préalable à la demande d'acte statutaire. Ces étapes facultatives peuvent permettre au promoteur de projet de confirmer les exigences anticipées et de l'informer d'exigences manquantes à la compréhension du promoteur advenant le cas avant de poursuivre les démarches.

La « Bonne foi » d'un « gentlemen's agreement » fait référence à l'engagement tacite du MDDELCC de ne pas modifier l'encadrement légal approuvé par celui-ci lors de la délivrance de son approbation, et ce, pour la période de validité de l'approbation (MDDELCC 2014b). Le MDDELCC conserve cependant le pouvoir d'exiger la modification de l'approbation de manière unilatérale pour les raisons énumérées à l'article 31.17 de la LQE.

4.2 Définition des résidus selon l'esprit de la Loi

La définition de résidus miniers en vigueur aux yeux du gouvernement québécois est celle de la Directive 019 (MDDEP 2012) :

« Résidus miniers : Toute substance solide ou liquide, à l'exception de l'effluent final, rejetée par l'extraction, la préparation, l'enrichissement et la séparation d'un minerai, y compris les boues et les poussières résultants du traitement ou de l'épuration des eaux usées minières ou des émissions atmosphériques.

« Sont considérées comme des résidus miniers, les scories et les boues, y compris les boues d'épuration, rejetées lors du traitement utilisant majoritairement un minerai ou un minerai enrichi ou concentré par pyrométallurgie ou hydrométallurgie ou par extraction électrolytique.

« Sont également considérés comme des résidus miniers, les substances rejetées lors de l'extraction d'une substance commercialisable à partir d'un résidu minier et qui correspondent à celles qui sont déjà définies aux deux premiers alinéas. Sont exclus les résidus rejetés par l'exploitation d'une carrière ou d'une sablière, au sens du Règlement sur les carrières et sablières.

[...]

« Le troisième paragraphe tient compte des procédés de valorisation des résidus miniers qui peuvent également produire des résidus miniers. »

Le changement de statut peut affecter complètement l'encadrement législatif du produit obtenu. Les amendements calciques qui ne nécessitent pas d'autorisation pour l'entreposage et l'épandage en sont un exemple. L'utilisation de stérile minier par des bétonnières en est un autre. En effet, en démontrant que le résidu atteint les exigences requises pour ces utilisations, il démontre de ce fait que son utilisation n'a pas plus d'impact que le produit que les résidus miniers remplacent. L'encadrement légal des résidus est basé sur un principe de précaution que les résidus miniers peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement. Le changement de statut justifie également le changement d'encadrement légal.

Les résidus miniers sont des matières résiduelles au sens de sa définition, mais ne sont pas considérés matière résiduelle au sens de la Loi. En effet, dans la section VII concernant la gestion des matières résiduelles de la LQE, l'article 53.2 stipule que les résidus miniers sont exclus des dispositions de la LQE concernant les matières résiduelles. De plus, les résidus miniers ne sont pas considérés comme des sols, même s'ils sont sujets à des encadrements concernant des sols (MDDEP 2002; MDDELCC 2016a).

5 Discussion et recommandations

5.1 Matières résiduelles dangereuses

Dans certains cas, un résidu minier à valoriser en partie ou en totalité peut contenir de la matière dangereuse pour la santé humaine. Cela ne correspond pas à la définition de matières dangereuses du MDDELCC (2017a) qui a exclu les résidus miniers. Cette contradiction vient du fait que le MDDELCC a évalué au moment de l'adoption du RMD que l'encadrement apporté par les lois et règlements déjà en place était suffisamment adéquat (MDDELCC 2018), incluant entre autres la *Directive 019* qui reprend les analyses présentées dans le RMD. La législation et la réglementation actuelles entourant les exploitations minières sont assez bien adaptées pour encadrer la gestion des résidus miniers sur le site d'une mine, mais nécessitent des modifications pour encadrer la valorisation des résidus miniers hors site. Par exemple, pour les formes de valorisation pouvant être utilisée sur des terrains résidentiels, commerciaux, industriels (MDDEP 2002) ou agricoles (MDDELCC 2014a), l'encadrement pourrait ne plus être adéquat lorsque l'on sort des sites d'exploitation minière.

5.1.1 Utilisation du terme « résidus miniers »

Le terme « résidus miniers » utilisé dans les documents législatifs du MDDELCC ne concorde pas avec le terme fréquemment employé dans le milieu de l'ingénierie minière. Le terme du MDDELCC inclut les roches stériles et les résidus de l'usine de traitement (concentrateur) alors que le terme utilisé dans l'ingénierie minière désigne uniquement les résidus de l'usine de traitement. L'ensemble des roches stériles et de résidu de l'usine de traitement de concentrateur est plutôt désigné par le terme « rejets miniers » dans Aubertin et al. (2002). Le terme « résidus miniers » utilisé dans les documents législatifs du MDDELCC correspond donc au terme « rejets miniers » utilisé dans la plupart des documents techniques de l'industrie et du milieu académique. Les législateurs ne distinguent donc ni les procédés subis par les résidus miniers, ni les tailles des particules (fines, grossières, blocs), ni les états (liquide ou solides) des résidus miniers. En ingénierie, les formes et les états des résidus miniers sont des aspects

importants à considérer pour leur gestion. Ainsi, le terme « roche stérile » (« waste rock » en anglais) peut mieux refléter l'état économique des « roches » et le terme « résidus minier » (« tailings » en anglais) inclut l'information de forme et d'état des matériaux en question. On remarque même un mélange des deux termes au sein de la *Directive 019* qui parfois utilise le terme « résidus miniers » pour ne désigner que les résidus de l'usine de traitement et parfois les résidus miniers en général.

5.1.2 Représentativité des essais de lixiviation (TCLP, SPLP, CTEU-9)

L'utilisation du *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) comme test représentatif du relargage de contaminant par la matière testée dans un milieu quelconque a souvent été critiquée depuis son incorporation dans la législation et la réglementation américaine, notamment, par la National Mining Association (NMA, 1999) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minière (BRGM) (Colombel 2011). Le BRGM a comparé les différents essais de lixiviation retrouvés dans les législations et les réglementations européennes et américaines notamment en regard à la pratique de la valorisation. Les résultats ont montré que le TCLP surestimait les quantités de contaminants relâchés (Colombel 2011). Il est donc souhaitable d'effectuer également un test de lixiviation moins agressif et plus représentatif de l'exposition des matériaux aux précipitations acides (mélange d'acide sulfurique et d'acide nitrique à pH 4,2) tel que le Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) (CEAEQ 2012). Un test de lixiviation encore moins agressif tel que le CTEU-9 (Centre technique des eaux usées - Méthode 9) peut également être effectué afin d'évaluer la quantité de métaux lixiviables sans ajustement du pH de l'agent d'extraction (CEAEQ 2012).

Il faut noter que le concassage des échantillons de matériaux à tester requis par les tests de lixiviation peut produire des courbes granulométriques différentes d'un essai à l'autre. Un matériau peut donc donner des résultats différents, dépendamment de la proportion des particules fines qui ont des surfaces spécifiques plus grandes et influencent la réactivité du matériau. Le concassage de l'échantillon peut être

problématique puisqu'il ne reproduit pas l'effet potentiel d'enveloppement de la phase réactive par une phase inerte (« coating ») qui peut se produire comme c'est le cas pour les particules de sulfure entourées de fer déjà oxydé (Benzaazoua et al. 2018). Dans ces cas, le concassage expose les phases réactives. Il est à noter que cette problématique affecte les échantillons (tels que les roches stériles) sujets à un concassage préalable, ce qui n'est pas typiquement le cas pour les résidus de l'usine de traitement qui possèdent une granulométrie suffisamment fine. De plus, le TCLP recommande l'utilisation d'acide acétique (plutôt susceptible d'être retrouvé dans un site d'enfouissement contenant de la matière organique) et un pH très acide (2,88 lorsque la solution d'extraction numéro 2 est utilisée) qui ne représentent pas nécessairement les conditions du milieu. Ceci peut même entraîner une surestimation des métaux dissous comme le cuivre ou le fer qui ne se solubiliseraient pas à des pH neutres, ou bien une sous-estimation du potentiel de lixiviation de certains contaminants, dont l'arsenic qui est souvent présent dans les résidus d'usine de traitement des mines d'or et qui se solubilise mieux en milieux neutres ou basiques. Enfin, tous les tests de lixiviation, qui sont effectués en mode cuvée (« batch » en anglais) ne représentent pas le comportement dynamique du résidu minier avec son milieu environnant contrairement à des essais in situ ou des essais dynamiques tels que les essais en colonne (Colombel 2011).

Dans une revue de littérature sur la caractérisation des résidus miniers à l'intention du MDDELCC, Plante et al. (2015) soulèvent également différentes problématiques liées au test TCLP. Notamment, que celui-ci ne prend pas en compte la cinétique de réaction des minéraux à long terme, que les concentrations des espèces chimiques lixiviées peuvent être diluées par le rapport liquide/solide du test comparativement aux conditions in situ et que l'utilisation d'acide acétique peut altérer la solubilité des espèces chimiques comparativement aux conditions in situ. Il est recommandé de ne pas utiliser les essais de lixiviation comme seuls outils de décision et d'effectuer également des essais en colonne (bien qu'ils ne soient pas normalisés) et si possible des essais in situ.

Le TCLP devrait donc être plutôt utilisé comme un premier essai servant à trier les résidus non problématiques de ceux potentiellement problématiques. Un degré de prudence doit être apportée, d'une part, pour éviter les faux-négatifs qui pourraient potentiellement avoir des conséquences négatives sur l'environnement et d'autre part pour éviter trop de faux-positifs qui exigent des essais additionnels et des mesures de mitigations non appropriées.

5.2 Recommandations

5.2.1 Destinées aux législateurs

La définition attribuée aux résidus miniers dans un contexte de valorisation devrait être mieux définie. Il serait également pertinent de centraliser l'information, la législation et la réglementation, en particulier parce que l'encadrement des résidus miniers emprunte celui des sols, des matières dangereuses et des matières résiduelles alors que les résidus miniers ne font partie d'aucun de ces groupes.

De plus, l'application du titre « résidus miniers » peut constituer un frein dans la démonstration et la promotion du potentiel de valorisation des résidus miniers. La délivrance d'une autorisation nécessite une preuve de viabilité et des performances techniques concrètes en plus d'une entente économique écrite avec un acheteur ou un utilisateur. Selon la *Directive 019*, il est obligatoire d'évaluer le potentiel de valorisation seulement sur les résidus à faible risque. Or, certains procédés peuvent être utilisés pour neutraliser les résidus acidogènes et certaines avenues de valorisation sont réalisées sous des conditions non représentatives de l'analyse TCLP. Il serait pertinent de développer un système de classement pour les résidus miniers qui tient compte de la valorisation combinée à un encadrement légal flexible ou d'actualiser celui proposé par le *Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction* qui date de 2002.

Concernant le RMD spécifiquement, l'exclusion des résidus miniers apportés par l'article 2 devrait être reformulée pour inclure la gestion et la valorisation des résidus miniers hors site. L'exclusion actuelle ne

laisse entrevoir aucune nuance à ce sujet, alors qu'il y en a concrètement dans le cadre d'un projet de valorisation hors site.

5.2.1.1 Résidus miniers, rejets miniers, stériles et résidus de l'usine de traitement :

L'appellation choisie pour désigner l'ensemble des rejets produits sur un site minier correspondant à la définition actuelle de « résidus miniers » devrait être renommée « rejets miniers » afin d'éviter la confusion avec l'utilisation dans la plupart des publications techniques.

5.2.1.2 Tests de lixiviations plus représentatifs :

Tel que mentionné précédemment, il est souhaitable d'effectuer en sus du TCLP, des tests de lixiviation moins agressifs (CTEU-9) et plus représentatifs de l'exposition des matériaux aux précipitations acides tels que le Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP). Le TCLP devrait uniquement servir comme un test indicateur et de préclassement, réalisé conjointement avec le SPLP et le CTEU-9 et non comme un test unique représentatif de la réalité. Le protocole pour classer le potentiel de lixiviation des résidus miniers devrait pouvoir prendre en compte les conditions dans lesquels le résidu minier sera utilisé tel que la plage de pH et la distribution granulométrique.

5.2.2 Destinées aux promoteurs de projet de valorisation de résidus miniers

Le concept de la conception pour la fermeture (*designing for closure*) a pour but général qu'un site minier exploité soit à la fermeture en condition tel que les risques pour la santé et la sécurité sont éliminés, la production et la migration de contaminants sont contrôlées et que la surveillance et la maintenance du site soient minimales à long terme (Aubertin et al. 2016). Dans cet esprit, les minières ont tout avantage à évaluer le potentiel de valorisation de leur résidus miniers dès le début des étapes d'étude du projet ou de l'opération. Lors de cette phase, des changements de conception à l'usine peuvent plus facilement être réalisés afin de permettre une valorisation des résidus miniers. De plus, le processus itératif de communication avec les législateurs précédant l'approbation peut entraîner des changements dans les

procédés de traitement et dans les installations concernant la gestion des matières résiduelles. Si le projet de valorisation débute après que le plan de réaménagement et de restauration ait été approuvé par le Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN), les changements doivent aussi être approuvés par celui-ci, ce qui peut allonger le processus d'approbation. Finalement, une exploitation minière nécessite déjà une approbation du MDDELCC et la valorisation pourrait naturellement s'inclure à la demande comme méthode de gestion des matières résiduelles.

Tel que stipulé précédemment, les législateurs concernés doivent être contactés dès que le promoteur a réalisé une caractérisation suffisante de ses résidus miniers pour justifier une valorisation. Les législateurs, particulièrement le MDDELCC, favorisent une communication tôt dans le projet. Ils sont également les meilleures ressources concernant ce qui sera requis sur le plan législatif en fonction des caractéristiques des résidus. Enfin, l'échange d'information ne peut que contribuer positivement au développement du projet de valorisation.

Concernant la recherche de clients potentiels pour utiliser les résidus miniers comme matière première, plusieurs organisations dédiées à jumeler les entreprises entre elles dans un lien de synergie économique existent au Québec. Regroupées sous le réseau de *Synergie Québec*, leurs activités couvrent cependant principalement les centres de population au sud (Synergie Québec, 2018), alors que beaucoup d'exploitations minières se trouvent en Abitibi-Témiscamingue, sur la Côte-Nord ou bien dans le Nord-du-Québec. Ces organisations possèdent tout de même une expertise concernant la valorisation des rejets de l'industrie métallurgique développée par la principale filiale du réseau, le Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle (CTTÉI). Parmi ses projets notables, il y a la compagnie Harsco Métaux et Minéraux, sous division de Harsco au Québec qui valorise environ 1 million de tonnes par an de stériles et de laitiers de hauts fourneaux. Les formes de valorisations utilisées sont entre autres les agrégats pour asphalte ou pour béton d'ingénierie, le ballast de chemin de fer, les abrasifs routiers, les

amendements calciques et magnésiens, et diverses applications du génie civil. Plusieurs applications ont été développées pour des marchés de niches tels que des produits de captation du phosphore pour l'agriculture et l'aquaculture, ainsi qu'un déglacant routier non corrosif. Concernant les rejets humides, la filiale travaille présentement sur un projet de valorisation de 320 000 tonnes par an de boues inorganiques pour la fabrication de dalles de patio à contenu recyclé élevé (Maheux-Picard 2017; CTTÉI 2018).

Concernant la valorisation des résidus de bauxite spécifiquement, Balomenos et al. (2017) ont proposé une synthèse portant sur la conception du traitement du minerai de manière à favoriser la synergie (ou symbiose) industrielle.

5.3 Sujets à investiguer

La définition des matières résiduelles dangereuses étant complexe en ce qui a trait à toute matière résiduelle valorisée, il serait pertinent de détailler l'ensemble des étapes requises pour déterminer qu'une matière résiduelle n'est pas une matière dangereuse au sens de l'article 3 du RMD. Ces étapes pourraient être mises dans un ordre logique tel que selon le coût des analyses en laboratoire requises ou selon les analyses les plus pertinentes et déterminantes dans le processus. Par la suite, on peut affiner l'ordre de préférence selon le contexte géologique, le type de valorisation, le type de matériaux (stérile ou résidus de l'usine de traitement) et les procédés de minerais.

De plus, il y a peu d'encadrement législatif en ce qui a trait au démantèlement des produits faits à partir de résidus miniers. Certains produits suggérés par la littérature scientifique tels que des briques sont basés sur l'encapsulation des matières contaminantes ou réactives dans la matrice de la brique. Or, au moment de la démolition d'un ouvrage fait à partir de ces mêmes briques plusieurs décennies plus tard, la matrice encapsulant les composantes indésirables peut les relâcher sous forme de poussière dans l'environnement et dans l'air respiré par les travailleurs sur place. Il serait donc pertinent de documenter l'impact du temps et du démantèlement sur ces produits avec des matrices encapsulantes.

Il serait également intéressant d'investiguer les moyens et les besoins nécessaires pour favoriser la présence d'organismes entremetteurs pour la symbiose industrielle en Abitibi-Témiscamingue parmi le réseau de Synergie Québec. En effet, une grande majorité des exploitations minières du Québec sont situées en Abitibi-Témiscamingue ainsi que la présence d'une population considérable comparée à la Côte-Nord et le Nord-du-Québec. Il y aurait plusieurs opportunités de symbioses industrielles comme celle développée par Béton Fournier mentionné plus haut. Enfin, il serait constructif d'analyser comment le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec (MTMEQ) évalue l'utilisation de stériles miniers pour les développements routiers à proximité des exploitations minières et si un processus uniformisé peut s'en dégager.

6 Conclusions

Le présent article dresse un portrait de la réglementation encadrant la valorisation des résidus miniers hors site au Québec. L'esquisse de ce portrait a permis de dégager les principales étapes d'un projet de valorisation des résidus miniers et les lois et règlements applicables. Plusieurs principes directeurs dans la formulation de ces lois et règlements ont été étudiés tels que le *gentlemen's agreement* (engagement d'honneur), la responsabilité environnementale définie selon le propriétaire des résidus, mais aussi du terrain sur lequel ceux-ci sont entreposés, la contrainte de gestion sur site intrinsèque à la formulation de cet encadrement ainsi que l'article 22 de la LQE au centre de ces principes. Une revue de différentes avenues de valorisation recensées dans la littérature scientifique a permis de dégager les AAM et les géopolymères comme technologies prometteuses dans la valorisation des résidus de l'usine de traitement. Mais certains aspects de la Loi limitent actuellement l'applicabilité des ciments AAMs et des ciments géopolymères dans l'industrie civile. Notamment, l'utilisation de la norme CAN/CSA-A3000-F13 Compendium des matériaux liants.

Des réflexions concernant la reconnaissance de l'expertise technique de l'industrie par les législateurs, l'esprit de la Loi liée aux résidus miniers, aux RMD et à ses critères de lixiviation ainsi que le chevauchement entre les différents lois et règlements ont permis d'identifier l'avantage des promoteurs de projet à contacter les législateurs dès le début du processus et la nécessité pour les ministères d'uniformiser et de centraliser l'information concernant l'encadrement légal de la valorisation des résidus miniers.

Enfin, beaucoup d'autres sujets, d'étapes et de collaborations restent à entreprendre par différents acteurs tel que les chercheurs, les législateurs et l'industrie pour légitimer la pratique de la valorisation des résidus miniers.

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants des supports financiers du CRSNG (RGPIN-402318-2012), du FRQNT (2015-MI-191676; 2017-MI-202860) et des partenaires industriels de l'IRME UQAT-Polytechnique. La première auteure remercie Mme Annie Cassista et Dr Réjean Hébert pour leur temps et le partage de leur expertise ainsi que Jean-François Magnan et Jessica Lavergne pour l'expérience acquise sur le sujet chez Nemaska Lithium. Les auteurs insistent à exprimer leurs reconnaissances aux trois réviseur(e)s pour les nombreux commentaires et suggestions qui ont contribué grandement à améliorer la qualité de l'article.

Annexe 1 : Lois et règlements applicables à encadrer la valorisation des résidus miniers

Fédéral :

- Loi sur les pêches
- Loi sur la prévention de la pollution des eaux arctiques
- Règlement sur les avis de rejet ou d'urgence environnementale
- Loi canadienne sur la protection de l'environnement
- Règlement sur les avis de rejet ou d'immersion irréguliers

- Règlement sur la prévention de la pollution des eaux arctiques
- Règlement multisectoriel sur les polluants atmosphériques
- Règlement sur les produits contenant du mercure
- Loi canadienne sur l'évaluation environnementale (2012)
- Loi de 1994 sur la convention concernant les oiseaux migrateurs
- Loi sur les espèces en péril
- Loi de 1992 sur le transport des marchandises dangereuses
- Règlement sur les effluents des mines de métaux
- Règlement sur le rejet d'amiante par les mines et usines d'extraction d'amiante
- Règlement désignant les activités concrètes
- Règlement sur le transport des marchandises dangereuses
- Règlement sur les produits dangereux

Provincial :

- Loi sur la qualité de l'environnement (LQE)
- Règlement relatif à l'application de la loi sur la qualité de l'environnement
- Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère
- Règlement sur la déclaration des prélèvements d'eau
- Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère
- Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement dans une partie du Nord-Est québécois
- Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement et le milieu social dans le territoire de la Baie James et du Nord québécois
- Règlement relatif à l'évaluation des impacts sur l'environnement de certains projets
- Arrêté ministériel concernant les frais exigibles en vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement
- Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables
- Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection
- Règlement sur la qualité de l'atmosphère
- Règlement sur la redevance exigible pour l'utilisation de l'eau
- Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles
- Loi sur les espèces menacées ou vulnérables

- Règlement sur les espèces fauniques menacées ou vulnérables et leurs habitats
- Règlements sur les espèces floristiques menacées ou vulnérables et leurs habitats
- Règlement sur les habitats fauniques.
- Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune
- Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles
- Loi sur le régime des eaux
- Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier
- Loi sur la conservation du patrimoine naturel
- Loi sur les parcs
- Règlement sur le domaine hydrique de l'état

Annexe 2 : Guides essentiels de l'encadrement légal dans la valorisation des résidus miniers

Concernant les exploitations minières ayant ou étant en voie d'obtenir une attestation d'assainissement :

- Références techniques pour la première attestation d'assainissement en milieu industriel : Établissements miniers
- Guide explicatif : Droits annuels exigibles des titulaires d'une attestation d'assainissement en milieu industriel
- Orientations pour la première attestation d'assainissement en milieu industriel : Établissements miniers

Concernant l'ensemble des exploitations minières (avec ou sans attestation d'assainissement) :

- Directive 019

Concernant l'ensemble des projets de valorisation de résidus miniers hors site :

- Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés
- Guide explicatif : Projet industriel Demande de certificat d'autorisation Demande d'autorisation
- Guide d'intervention Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés
- Lignes directrices relatives à la valorisation des résidus miniers

Concernant les produits faits à partir de résidus miniers valorisés :

- Guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes

- Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction

Annexe 3 : Lois et règlements reprises par le Guide Explicatif - Projet Industriel-Demande de Certificat d'Autorisation - Demande d'Autorisation

- Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement
- Règlement sur les attestations d'assainissement en milieu industriel
- Loi sur le régime des eaux
- Loi sur la sécurité des barrages
- Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier
- Loi sur les espèces menacées ou vulnérables.
- Loi sur la conservation du patrimoine naturel
- Loi sur les parcs
- Règlement sur le domaine hydrique de l'état
- Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains
- Règlement sur le stockage et les centres de transfert de sols contaminés
- Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles
- Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés
- Règlement relatif à l'application de la Loi sur la qualité de l'environnement
- Règlement sur les habitats fauniques
- Règlement sur les espèces fauniques menacées ou vulnérables et leurs habitats
- Règlement sur les espèces floristiques menacées ou vulnérables et leurs habitats
- Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection
- Règlement sur la déclaration des prélèvements d'eau
- Règlement sur la redevance exigible pour l'utilisation de l'eau
- Règlement sur la qualité de l'eau potable
- Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées
- Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère
- Règlement sur la qualité de l'atmosphère
- Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère

- Règlement sur les matières dangereuses
- Règlement sur les lieux d'élimination de neige

Bibliographie

- Ahmari S. 2012. Recycling and reuse of wastes as construction material through geopolymerization. Thèse de doctorat. University of Arizona.
- Ahmari S. et Zhang L. 2012. Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. *Constr. Build. Mater.*, **29**: 323-331.
- Alliance Magnésium 2013. Une technologie qui redéfinit la norme. Disponible sur : <http://alliancemagnesium.com/fr/profil/technologie/> (consulté le 2 février 2018).
- Aubertin M., Bussière B., Bernier L., Chapuis R., Julien M., Belem T., Simon R., Mbonimpa M., Benzaazoua M. et Li L. 2002. La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement. Congrès annuel de la Société Canadienne de génie civil, Montréal, Qc.
- Aubertin M., Bussière B., Pabst T., James M. et Mbonimpa M. 2016. Review of reclamation techniques for acid generating mine wastes upon closure of disposal sites. Geo-Chicago: Sustainability, Energy and the Geoenvironment, Chicago, August 14-18, 2016. ASCE.
- Balomenos E., Davris P., Pontikes Y. et Panias D. 2017. Mud2Mettal : Lessons Learned on the Path for Complete Utilization of Bauxite Residue Through Industrial Symbiosis. *J. Sustain. Metall.*, **3**: 551-560.
- Benzaazoua M., Chopard A., Elghali A., Taha Y., Bouzahzah H. et Mermillod-Blondin R. 2018. Contribution of applied mineralogy in the prediction of contaminated mine drainage. Symposium Mines et Environnement 2018, Rouyn-Noranda. 26p.
- Bussière B. 2007. Colloquium 2004 : Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, **44**, 1019-1052.
- Bussière B., Demers I., Charron P. et Bossé B. 2017. Analyse de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois. Disponible sur <https://mern.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/analyse-changements-climatiques-secteur-minier.pdf> (consulté le 20 juin 2018). 331p.
- Caballero E., Sánchez W. et Ríos C.A. 2014. Synthesis of geopolymers from alkaline activation of gold mining wastes. *Ing. Compet.*, **16**(1) : 317-330.
- CAN/CSA group 2013. Can/CSA-A30000-F13-Compendium des matériaux liants. 4^{ème} édition. Canadian Standard Association.
- Cassista A. 2017. Question sur les résidus miniers [courrier électronique à Marie Tardif-Drolet]. Communication le 31 mars 2017.

- CEAEQ 2012. Protocole de lixiviation pour les espèces inorganiques, MA. 100 – Lix.com.1.1, Rév. 1, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, 17 p.
- CTTÉI 2018. Dalles de patio écologiques. Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle. Disponible en ligne sur : <http://www.cttei.com/dalles-de-patio-ecologiques/> (consulté le 2 février 2018).
- Chouinard S. 2006. Valorisation des résidus de serpentine par extraction de magnésium au moyen de procédés hydrométallurgiques. Mémoire de maîtrise en sciences de l'eau. Québec : Université du Québec - Institut national de la recherche scientifique (INRS).
- Colombel L. 2011. Caractérisation du comportement à la lixiviation : quels essais pour quels objectifs ? – Rapport final. BRGM/RP-60088-FR. Disponible sur : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60088-FR.pdf>
- Dalcé J.B., Li L. et Yang P.Y. 2019. Experimental study of uniaxial compressive strength (UCS) distribution of hydraulic backfill associated with segregation. *Minerals*, **9**(3), 147.
- Davidovits J. 2015. Geopolymer chemistry & applications, 4^{ème} édition. Geopolymer Institute.
- Desmarchais O. 2005. Les attestations d'assainissement au Québec : des ententes environnementales avantageuses pour l'industrie ou l'environnement? Mémoire de maîtrise en législation. Montréal : Université McGill.
- Faubert J-P. 2013. Valorisation de particules fines dans les bétons compactés au rouleau et les bétons moulés à sec. Mémoire de maîtrise en génie civil, Sherbrooke. Université de Sherbrooke, 142p.
- FHWA 2016. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Federal Highway Administration. Disponible sur <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/mwst1.cfm>.
- Feng D., Provis J.L. et van Deventer J.S.J. 2011. Thermal Activation of Albite for the Synthesis of One-Part Mix Geopolymers. *J. Am. Ceram. Soc.*, **95**(2): 565-572.
- Fournier et Fils inc., 2016. Entente avec Integra Gold pour l'ancien site Sigma. Disponible sur : <http://www.fournier-fils.com/fr/entente-avec-integra-gold-pour-lancien-site-sigma/> (consulté le 2 février 2018).
- Garcia-Valles M., Avila G., Martinez S., Terradas R. et Nogués J.M. 2007. Heavy metal-rich wastes sequester in mineral phases through a glass-ceramic process. *Chemosphere*, **68**: 1946-1953.
- Geopolymer Institute 2014. Part 1: Why Alkali Activated Materials are NOT Geopolymers? [En ligne] Disponible sur : <https://www.geopolymer.org/fr/faq/les-materiaux-activation-alkaline-pas-geopolymeres/> (consulté le 2 février 2018).
- Geopolymer Institute. 2016. Part 3: Why Alkali Activated Materials are NOT Geopolymers ? Part 3 : What scientists are now writing about the issue. Disponible sur : <https://www.geopolymer.org/fr/faq/les-materiaux-activation-alkaline-pas-geopolymeres/> (consulté le 2 février 2018).
- Gervais D., Roy C., Thibault A., Pednault C. et Doucet D. 2014. Technical report on the mineral resource and mineral reserve estimates for the Canadian Malartic property – NI 41-101- Mine Canadian Malartic. 460 p.

- Gopez R.G. 2015. Utilizing Mine Tailings as Substitute Construction Material: The Use of Waste Materials in Roller Compacted Concrete. *Open Access Library Journal*, **2**: 22199.
- Graymont (Qc) inc. c. Québec, 2015 Qc CPTAQ 71264
- Harsco 2012. À propos de Harsco Minéraux. Les Minéraux Harsco. Disponible sur : <http://www.harscomineraux.com/> (consulté le 2 février 2018).
- Hébert R. 2017. Communication personnelle. Centre de Technologie Minérale et de Plasturgie (CTMP), Theford Mines, Canada.
- Idres A., Abdelmalek C., Bouhejda A., Benselboub A. et Bounouala M. 2017. Valorization of mining waste from Ouenza iron ore mine (eastern Algeria). *Rem: Int. Eng. J. – Ouro Preto*, **70** (1): 85-92.
- Komnitsas K., Zaharaki D. et Bartas G. 2012. Effect of sulphate and nitrate anions on heavy metal immobilization in ferronickel slag geopolymers. *Appl. Clay Sci.* **73**: 103-109.
- Lalancette J.M., Chevalier-Bulter J.P. et Desrosiers L. 1986. Foundry sand derived from serpentine and foundry molds derived therefrom. Brevet US4604140A, 5 août 1986.
- Li L. 2014a. An analytical solution for determining the required strength of a side-exposed mine backfill containing a plug. *Can. Geotech. J.* **51**(5): 508-119.
- Li L. 2014b. A generalized solution for mining backfill design. *Int. J. Geomech.* **14**(3): 04014006.
- Li L. et Aubertin M. 2012. A modified solution to assess the required strength of exposed backfill in mine stopes. *Canadian Geotechnical Journal*, **49**(8): 994-1002.
- Liu G.S., Li L., Yao M., Landry D., Malek F., Yang X.C. et Guo L.J. 2017. An investigation of the uniaxial compressive strength of a cemented hydraulic backfill made of alluvial sand. *Minerals* **7**(4): 1-13.
- Liu G.S., Li L., Yang X.C., Guo L.J. 2018. Required strength estimation of a cemented backfill with the front wall exposed and back wall pressured. *Int. J. Min. Mineral Eng.* **9**(1): 1-20.
- Liu W.Z., Wu T., Li Z. et Hao X.J. 2015. Preparation and characterization of ceramic substrate from tungsten mine tailings. *Constr. Build. Mater.*, **77**: 139-144.
- Luukkonen T., Abdollahnejad Z., Yliniemi J., Kinnunen P. et Illikainen M. 2017. One-part alkali-activated materials: A review. *Cem. Concr. Res.*, **103**: 21-34.
- Ma D., Wang Z., Guo M., Zhang M. et Liu J. 2014. Feasible conversion of solid waste bauxite tailings into highly crystalline 4A zeolite with valuable application. *Waste Manage.*, **34**: 2365-2372.
- Maheux-Picard C. 2017. Approche circulaire de l'industrie métallurgique à Sorel-Tracy – Importance de l'innovation, 23 novembre 2017, Québec Mines 2017, Québec.
- Mehta A. et Siddique R. 2016. An overview of geopolymers derived from industrial by-products. *Constr. Build. Mater.*, **127**: 183-198.
- MDDELCC 2014a. Lignes directrices relatives à la valorisation des résidus miniers Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

- MDDELCC 2014b. Orientations pour la première attestation d'assainissement en milieu industriel-établissements miniers. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
- MDDELCC 2016a. Loi sur la Qualité de l'Environnement (LQE), Q-2, à jour au 1^{er} octobre 2016, [Québec], Éditeur officiel du Québec, 2016. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
- MDDELCC 2016b. Guide d'intervention- Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
- MDDELCC 2017a. Règlement sur les matières dangereuses, Q-2 r.32, à jour au 1^{er} octobre 2017, [Québec], Éditeur officiel du Québec, 2017.
- MDDELCC 2017b. Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés : Plan d'action 2017-2021. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/politique.pdf> (consulté le 2 février 2018)
- MDDELCC 2018. Les matières dangereuses – le règlement en bref. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Disponible sur : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/matieres/dangereux/> (consulté le 2 février 2018)
- MDDEP 2002. Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
- MDDEP 2008. Guide d'information sur l'utilisation des objectifs environnementaux de rejet relatifs aux rejets industriels dans le milieu aquatique, Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
- MDDEP 2009. Lignes directrices relatives à la gestion du béton, de brique et d'asphalte issus des travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille, Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
- MDDEP 2011. Politique Québécoise de gestion des matières résiduelles- Plan d'action 2011-2015 Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
- MDDEP 2012. Directive 019 sur l'industrie minière, Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
- MERN 2017a. Rapport annuel de gestion 2016-2017. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec. Disponible sur : <https://mern.gouv.qc.ca/publications/ministere/rapport/RAG-2016-2017.pdf> (consulté le 2 août 2018).
- MERN 2017b. Le secteur minier du Québec - Septembre 2017. M01-02-1709. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec, 2017.

- MiningWatch Canada 2014. The big hole – Environmental Assessment and Mining in Ontario. Canary Research Institute. Disponible sur ligne: https://miningwatch.ca/sites/default/files/the_big_hole_report.pdf)
- NMA 1999. US EPA archive document. National Mining Association. Disponible sur ligne : <https://archive.epa.gov/epawaste/hazard/web/pdf/comments.pdf> (consulté le 2 février 2018).
- Olimag 2018. Sable d'abrasion. Les Sables Olimag inc. (. Disponible sur ligne : <https://www.olimag.com/fr/abrasion/> (consulté le 2 février 2018).
- Pacheco-Torgal F., Castro-Gomes J.P. et Jalali S. 2007. Investigations on mix design of tungsten mine waste geopolymeric binder. *Constr. Build. Mater.*, **22**: 1939-1949.
- Pacheco-Torgal F. et Said J. 2011. Resistance to acid attack, abrasion and leaching behavior of alkali-activated mine waste binder. *Mater. Struct.*, **44**(2): 487-498.
- Pacheco-Torgal F., Castro-Gomes J. et Jalali S. 2010. Durability and Environmental Performance of Alkali-Activated Tungsten Mine Waste Mud Mortar. *J. Mater. Civ. Eng.*, **22**(9): 897-904.
- Pagé P., Li L., Yang P.Y. et Simon R. 2019. Numerical investigation of the stability of a base-exposed sill mat made of cemented backfill. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **114**: 195–207.
- Plante B., Bussière B., Bouzazhah H., Demers I. et Babacar Kandji E.H. 2015. Revue de littérature en vue de la mise à jour du guide de caractérisation des résidus miniers et du minerai – PU-2013-05-806. Rapport soumis au MDDELCC et disponible sur le site web de BAPE (http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/mine_apatite_lac-a-paul/documents/DB41.pdf).
- Purdon R. 2017. Implementing mine closure plans. GéoOttawa 2017, CGS. Disponible sur : <http://bc-mlard.ca/files/presentations/2017-21-PURDON-implementing-mine-closure-ontario.pdf> (consulté le 24 mars 2018).
- Provis J.L. 2017. Alkali-activated materials. *Cem. Concr. Res.*, **114**: 40-48.
- Sakkas K., Nomikos P., Sofianos A. et Panias D. 2014. Utilisation of FeNi-Slag for the Production of Inorganic Polymeric Materials for Construction or for Passive Fire Protection. *Waste Biomass Valorization*, **5**: 403-410.
- Saleh Mbemba F. 2016. Évaluation du drainage, de la consolidation et de la dessiccation des résidus miniers fins en présence d'inclusions drainantes. Thèse de doctorat en génie minéral. École Polytechnique de Montréal. 555p.
- Silva I., Castro-Gomes J.P. et Albuquerque A. 2012. Effect of immersion in water partially alkali-activated materials obtained of tungsten mine waste mud. *Constr. Build. Mater.*, **35** : 117-124.
- Synergie Québec 2018. Des projets partout au Québec! Disponible sur : <https://www.synergiequebec.ca/> (consulté le 2 février 2018)
- Taha Y., Benzaazoua M., Hakkou R. et Mansori M. 2017. Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production. *Miner. Eng.*, **107**:123-138.
- Tardif-Drolet M. 2018. Encadrement réglementaire de la valorisation des résidus miniers hors site au Québec. Mémoire de maîtrise en génie minéral. École Polytechnique de Montréal.

- USEPA 1994. Technical Assistance Document for complying with the TC rule and implementing the toxicity characteristic leaching procedure (TCLP). United States Environmental Protection Agency. Disponible sur : https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/tclp-1994_0.pdf (consulté le 2 février 2018).
- Van Deventer J.S.J. et Xu H. 2000. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *Int. J. Miner. Process.*, **59**: 247-266.
- Van Deventer J.S.J., Provis J.L. et Duxson P. 2012. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Miner. Eng.*, **29**: 89-104.
- Vick S.G. 1990. Planning, design, and analysis of tailings dams. BiTech Publishers.
- Ville de Terrebonne c. 3479447 Canada Inc. 2014. QCTAQ 06178, au para 55.
- Wang W.C., Wang H.Y. et Lo M.H. 2014. The engineering properties of alkali-activated slag pastes exposed to high temperatures. *Constr. Build. Mater.*, **68**: 409-415.
- Yang P.Y., Li L. et Aubertin M. 2017. A new solution to assess the required strength of mine backfill with a vertical exposure. *Int. J. Geomech.* **17**(10): 04017084.
- Zhang L. 2013. Production of bricks from waste materials -A review. *Constr. Build. Mater.*, **47**: 643-655.
- Zhang M., Zhao M., Zhang G., Mann D., Lumsden K. et Tao M. 2016. Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water. *Constr. Build. Mater.*, **124**: 373-382.